

на фізико-механичних свойствах готових бетонних изделий.

Выводы. Полученные результаты наглядно демонстрируют возможность существенным образом оказывать влияние на эксплуатационные свойства бетона, изменяя его структуру путем учета совместимости химических добавок с цементами.

Показано, что несмотря на одну и ту же маркировку цементы разных производителей могут в зависимости от вида применяемых химических добавок способствовать улучшению/ухудшению основных свойств бетона. Предварительные физико-химические исследования процессов твердения и структурообразования бетонов с химическими добавками с позиций их совместимости позволят избежать брака и производить изделия с заданными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА:

1. ДСТУ Б В.2.7-237:2010 «Будівельні матеріали. Камені бетонні і залізобетонні бортові. Технічні умови».
2. ГОСТ 10180-90 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
3. Ушеров-Маршак А.В. Термопорометрия цементного камня. / А.В. Ушеров-Маршак, В.П. Сопов // Коллоидный журнал, 1994, т.56, №4. – с. 600-603.
4. Рекомендации по применению пластифицирующих добавок MC Bauchemie Russia в производстве сборных и монолитных бетонных и железобетонных изделий и конструкций. Санкт-Петербург. – 2007. – 64 с.
5. Johnston C.D., Admixture-Cement Incompatibility: A Case History. // Concrete International, Vol. 9, No. 4, 1987, pp. 51-60
6. Dogra A., Bhardwaj R. Study of the Admixture-cement Compatibility for the Economic Production of Special Concretes. // International Journal of Civil Engineering Research. - Volume 5, Number 1 (2014), pp. 43-48.
7. Ушеров-Маршак, А.В. Совместимость цементов с химическими минеральными добавками / А.В.Ушеров-Маршак, М.Циак, Л.А.Першина // Цемент и его применение. 2002. -4:1. - №6. -С.6-8.

УДК 691.328

Кондращенко О.В., Єрохіна А.В.,

Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова,

Кондращенко В.І., Гусєва А.Ю., Кудрявцева В.Д.

Московський державний університет шляхів сполучень

ІНТЕГРОВАНІЙ ПІДХІД ДО ОПТИМІЗАЦІЇ СКЛАДІВ БЕТОНІВ

Сучасні тенденції в будівельному матеріалознавстві відрізняються більш жорсткими вимогами до якості сировини, технології отримання будівельних композитів і експлуатаційних властивостей виробів. В основу цих вимог має бути покладений принцип сталого розвитку цивілізації, що передбачає врахування інтересів як сучасників, так і наступних поколінь. Стосовно до будівельного матеріалознавства домінянтою такого принципу виступає пріоритетне забезпечення екологічної ефективності прийнятих рішень на всіх стадіях життєвого циклу виробу - від впливу на навколишнє середовище вихідної сировини, технологічних процесів і готової продукції, до утилізації останньої. Тим самим отримання

екологічно безпечної і в той же час економічної продукції є складною багатоцільовою і багатопараметричною задачею, ефективність вирішення якої визначається застосовуваною методологією.

В даний час в основу такої методології в науці і техніці, зокрема, будівництві покладено *диференційований підхід*, при якому завдання поділяються на «технологічну» і «конструкторську» складові. У першому випадку рецептурно-технологічні параметри призначають технологи без урахування особливостей роботи матеріалу в конструкції («на марку»), а в другому розрахунок виробів проводять конструктори по СНіП, не враховуючи вже рецептуру і

технологічні параметри виготовлення виробів.

На відміну від диференційованого інтегрований підхід передбачає проведення оптимізації рецептурно-технологічних параметрів отримання будівельних матеріалів і виробів за комплексом вимог, що пред'являються не тільки до матеріалу і технологічних параметрів виготовлення виробів, але й самої конструкції, для виготовлення якої цей матеріал був призначений.

Для коректної постановки і вирішення оптимізаційної задачі необхідно визначити цільову функцію, у якості якої приймається вартість одиниці об'єму залізобетонної конструкції

$$C_{bc}(x) = \sum c_i + \sum c_l + (\sum T_{ja} c_{ja})/V_b, \quad (1)$$

де: V_b – об'єм бетону в конструкції, m^3 ; c_i – вартість i -й ($i = 1, \dots, L$) складової бетонної суміші в одиницю об'єму бетону, $руб./m^3$; c_k – приведена до $1 m^3$ бетону вартість l -го технологічного переділу ($l = 1, \dots, L$), $руб./m^3$; T_{ja} – маса арматури j -го класу ($j = 1, \dots, J$) у виробі, т; c_{ja} – вартість одиниці маси арматури j -го класу, $руб./т$; x – варійовані параметри (у формулі (1) і далі у символі Σ індекси суми спростовані).

Особливості методології інтегрованого підходу розглянемо на прикладі оптимізації складів бетону залізобетонних конструкцій без урахування технологічних особливостей їх виготовлення, тобто при вирішенні тільки рецептурного завдання. Тоді внесок технологічних витрат в (1) буде постійний і його можна не враховувати при варіантному проектуванні складу бетону, а цільова функція $C_{bc}(x)$ буде являти собою вартість одиниці об'єму залізобетонної конструкції

$$C_{bc}(x) = \sum c_i + (\sum T_{ja} c_{ja})/V_b. \quad (2)$$

Задачу оптимізації складу бетону з урахуванням вимог, що пред'являються як до властивостей бетонної суміші (наприклад, за рухливістю, нерозшарованістю, об'ємом міжзернових порожнин тощо) і бетону (наприклад, за середньою густиною, міцністю, морозостійкістю тощо), так і залізобетонної конструкції, для виготовлення якої цей бетон призначений (наприклад, за міцністю, жорсткістю, тріщиностійкістю та ін.), сформулюємо наступним чином:

знайти витрати складових бетонної суміші x_i , при яких забезпечується мінімальна вартість матеріалів в одиниці об'єму залізобетонної конструкції $C_{bc}(x)$ і виконуються вимоги, що до властивостей бетонної суміші та бетону, так і конструкції з цього бетону, або, в математичній постановці:

$$\text{знайти значення } x(x_1, \dots, x_l), \quad (3)$$

$$\text{при яких } C_{bc}(x) \Rightarrow \min \quad (4)$$

і одночасно виконуються вимоги щодо:

– властивостей бетонної суміші і бетону $\varphi_{mb}(x_i) \mathfrak{R} [\varphi_{mb}(x_i)]; \quad (5)$

– властивостей залізобетонної конструкції $\varphi_c(x_i, x_r, x_j) \mathfrak{R} [\varphi_c(x_i, x_r, x_j)]; \quad (6)$

– витратам складових бетонної суміші $x_i \mathfrak{R} [x_i]; \quad (7)$

– розмірам конструкції $x_r \mathfrak{R} [x_r]; \quad (8)$

– її армуванню $x_j \mathfrak{R} [x_j], \quad (9)$

де x_i – варійовані параметри, що представляють собою витрати складових бетонної суміші в $1 m^3$ бетону; x_r і x_j – те ж саме, що характеризує відповідно розміри і армування конструкції; $\varphi_{mb}(x_i)$ – функції відгуку, що представляють собою властивості бетонної суміші та бетону залежні від складових бетонної суміші x_i ; $\varphi_c(x_i, x_r, x_j)$ – те ж саме, що є властивостями конструкції і залежні від складових бетонної суміші x_i , її розмірів x_r і армування x_j ; $[\varphi_{mb}(x_i)]$, $[\varphi_c(x_i, x_r, x_j)]$ – допустимі значення функцій відгуку $\varphi_{mb}(x_i)$ і $\varphi_c(x_i, x_r, x_j)$; $[x_i]$, $[x_r]$ і $[x_j]$ – те ж саме варійованих параметрів x_i , x_r і x_j ; символ \mathfrak{R} показує знаки $<$, $=$, $>$, \leq або \geq , що використовівані при складанні одно- (наприклад, виду $x_i \geq [x_i]$) і двохсторонніх (наприклад, виду $[x_i'] \leq x_i \leq [x_i'']$) обмежень.

Рішення задачі оптимізації складу бетону у наведеному вище формулюванні може бути отримано різними методами, наприклад, на основі принципу розподілу змінних параметрів [1]. У відповідності з цим принципом з усіх варійованих параметрів x , від яких залежить цільова функція $C_{bc}(x)$, виділимо змінні параметри, що визначають склад бетонної суміші x_1, \dots, x_l , розміри залізобетонної конструкції x_{l+1}, \dots, x_p і характеристики її армування x_{p+1}, \dots, x_j . Далі

змінні параметри, що характеризують склад бетонної суміші x_i , віднесемо до 1-ї групи, розміри конструкції x_p – до 2-ї групи зовнішніх змінних параметрів, а параметри, що характеризують армування виробу x_j – до групи внутрішніх змінних параметрів.

У свою чергу, для допустимих значень властивостей бетонної суміші, бетону і конструкції також виділяють зовнішні (5) і (7) обмеження, що містять тільки зовнішні змінні параметри x_i , і внутрішні (6), (8) і (9) обмеження, що містять зовнішні x_p і внутрішні або тільки внутрішні змінні параметри x_j . Тоді пошук значень змінних x , що забезпечують досягнення цільовою функцією $C_{bc}(x)$ мінімального значення, буде являти собою процес оптимізації, а отриманий при цьому результат – рішенням внутрішньої задачі оптимізації, якщо оптимізація проводиться при фіксованих зовнішніх змінних параметрах, і рішенням зовнішньої задачі оптимізації, якщо зовнішні і внутрішні або тільки зовнішні змінні параметри можуть змінюватися.

Зовнішню задачу оптимізації вирішують проведенням дослідів, кожен з яких включає фіксування зовнішніх змінних параметрів, перевірку зовнішніх обмежень, рішення внутрішньої задачі оптимізації і обчислення цільової функції. Досліди відрізняються значеннями зовнішніх змінних параметрів, які змінюють від досліду до досліду у відповідності з певним правилом – алгоритмом. Рішення внутрішньої задачі оптимізації при цьому зводиться до розрахунку залізобетонної конструкції за СНіП 2.03.01 на бетонні та залізобетонні конструкції при фіксованих зовнішніх змінних параметрах.

Відповідно до блок-схемою, наведеною на рис. 1, будемо розрізняти такі задачі оптимізації складів бетону залізобетонних конструкцій:

– *завдання 1*: варіюють тільки 1-у групу зовнішніх змінних параметрів x_i , така ситуація виникає при традиційному ("з позиції технологів") вирішенні рецептурного завдання "на марку", тобто з урахуванням вимог, що пред'являються тільки до властивостей бетонної суміші та бетону (п. 5 на рис. 1);

– *завдання 2*: варіюють 1-у групу зовнішніх змінних параметрів x_i , при фіксованих розмірах конструкції x_p і її армуванні x_j ; в цьому випадку склад бетону оптимізують для типової конструкції, розміри і армування якої не змінюються (п. 4, 5);

– *завдання 3*: варіюють як 1-у, так і 2-у групи зовнішніх змінних параметрів x_i і x_p при фіксованому армуванні конструкції x_j ; така ситуація виникає, наприклад, при підвищенні несучої здатності конструкції за рахунок зміни її розмірів (п. 3-5);

– *завдання 4*: варіюють зовнішні (склад) x_i і внутрішні (армування) x_j змінні параметри при фіксованих розмірах конструкції x_p ; в цьому випадку поряд з оптимізацією складу бетону проводиться і оптимізація армування конструкції (п. 2-5);

– *завдання 5*: варіюють як зовнішні x_i і x_p , так і внутрішні змінні параметри x_j ; така постановка задачі виникає в загальному випадку інтегрованого підходу до оптимізації витрат складових бетону x_i (п. 1-5).

Процедура вирішення *завдань 1-5* полягає у проведенні дослідів. У першому досліді привласнюють (випадковим чином або на підставі наявного досвіду) значення 1-ї групи зовнішніх змінних параметрів x_i^* і перевіряють виконання зовнішніх обмежень (7); далі обчислюють значення функцій відгуку $\varphi_{mb}(x_i^*)$ - властивостей бетонної суміші та бетону, і перевіряють виконання зовнішніх обмежень (5). Потім привласнюють фіксовані значення 2-ї групи зовнішніх змінних параметрів x_p^* , перевіряють умови виконання зовнішніх обмежень (8) і вирішують внутрішню задачу оптимізації - за СНіП 2.03.01 розраховують залізобетонну конструкцію, і, визначивши параметри x_j , що характеризують армування виробу, перевіряють виконання обмежень (6), (9) і обчислюють значення цільової функції $C_{bc}(x)$. При цьому якщо обмеження (5)-(9) не виконуються, то змінним параметрами привласнюють нові значення та їх перебір продовжують до завершення досліду.

Досліди повторюють необхідну кількість разів, яке залежить, за інших рівних умов, від прийнятого методу оптимізації цільової функції $C_{bc}(x)$. Наприклад, при використанні методу деформованого багатог-

ранника кожна реалізація досліду представляє в просторі змінних параметрів x вершину багатогранника, число вершин n якого повинно на одиницю перевищувати число варійованих параметрів, тобто $n = (I + P + J) + 1$.

Результати дослідів з початковими фіксованими значеннями варійованих змінних x^* формують вершини вихідного багатогранника. Надалі спочатку сформований багатогранник видозмінюють [2].

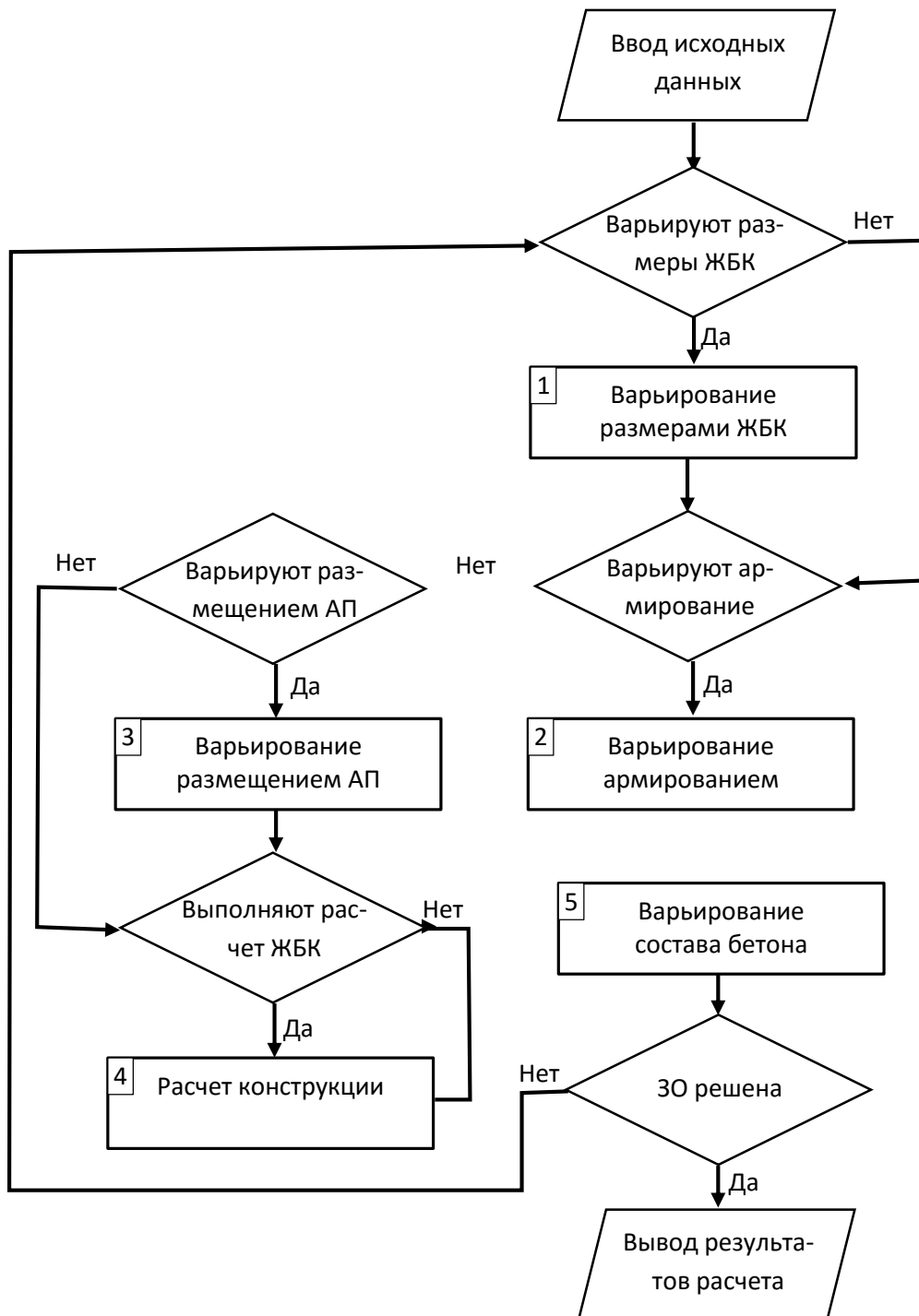


Рис. 1. Блок-схема рішення задачі оптимізації складу бетону залізобетонних конструкцій (АП - арматурний пакет; з.б.к. - залізобетонна конструкція; ЗО - завдання оптимізації)

Стосовно до сформульованої оптимізаційної задачі (3)–(9) алгоритм трансформування вихідного багатогранника полягає в обчисленні цільової функції в його вершинах і наступній заміні вершини, в якій цільова функція $C_{bc}(\mathbf{x})$ приймає максимальне значення $C_{bc}(\mathbf{x}^*)_{\max}$, на вершину з мінімальним її значенням $C_{bc}(\mathbf{x}^*)_{\min}$. Алгоритм закінчує роботу, якщо багатогранник, отриманий на деякому k -му кроці, збігається з багатогранником, одержаним на попередньому кроці алгоритму, або вироджується в точку. Обчислені при цьому значення витрат складових бетону x_i^k , а також x_p^k і x_j^k у вершині багатогранника з мінімальною величиною $C_{bc}(\mathbf{x}^k)_{\min}$ є оптимальними.

Для практичної реалізації описаного чи інших методів оптимізації існує проблема адекватного представлення функцій відгуку $\varphi_{mb}(x_i)$ – властивостей бетонної суміші та бетону (для функцій відгуку $\varphi_c(x_i, x_p, x_j)$ – міцності, жорсткості та тріщиностійкості конструкцій немає принципових труднощів, так як їх визначають розрахунком за СНіП 2.03.01) залежно від витрати складових бетону x_i . Таке уявлення може бути виконано з використанням експериментально-статистичних моделей, отриманих методами планування експерименту або регресійного аналізу [3].

Наведемо приклад застосування диференційованого та інтегрованого підходів для оптимізації складів високоміцного шлакопембетону. Експериментально встановлено, що є досить широкий діапазон зміни властивостей такого бетону при варіюванні витрати складових, яка досягає для міцності на осьовий розтяг 36 %, початкового модуля пружності 16 %, середній густині у сухому стані 220 кг/м³ при фіксованій міцності бетону при стиску [4]. При інтегрованому підході до оптимізації складів високоміцного шлакопембетону це дозволяє уникнути підвищення міцності бетону на стиск при незабезпеченні жорсткості і/або тріщиностійкості залізобетонної конструкції за рахунок підвищення міцності на розтяг і/або модуля пружності бетону варіюванням його складу.

При підборі складу такого бетону "на марку" був отриманий оптимальний склад з

витратою цементу 380 кг в 1 м³ бетонної суміші, а з урахуванням роботи бетону тій же міцності в плиті перекриття ПК 4.5-88.12, розрахованої при дії короточасного навантаження на міцність, жорсткість і тріщиностійкість, – з витратою цементу 402 кг [4]. Різниця у витратах цементу обумовлено необхідністю отримання бетону підвищеної пружності для забезпечення необхідної жорсткості плити перекриття. Якщо ж врахувати тривалі деформації, то навіть для такого крихкого матеріалу як бетон слід очікувати ще більшого розходження у витраті його складових при розгляді роботи матеріалу в конструкції.

На закінчення відзначимо, що ідея призначення складів бетону за комплексом вимог, що пред'являються не тільки до властивостей бетонної суміші, технологічних параметрів виготовлення залізобетонних виробів, властивостям бетону, але і конструкцій була, мабуть, вперше не тільки сформульована, і дано методичне обґрунтування шляхів її вирішення, але і практично реалізована в роботі [4]. Надалі ідея об'єднання задач будівельного матеріалознавства та будівельних конструкцій була сформульована у вигляді інтегрованого підходу до вирішення оптимізаційних задач бетонознавства отримала розвиток в роботі [5] стосовно до визначення раціональних складів і технологічних параметрів одержання не тільки важких бетонів (визначення раціонального технологічного режиму ротаційної технології), але і бетонів на пористих заповнювачах (на прикладі залізобетонних переднапружених шпал з високоміцного шлакопембетону), деревного пластику (технологія отримання деревного пресованого бруса і композиційних шпал), а також складу і технологічних параметрів отримання біопластику.

Дещо в іншому аспекті проблема інтегрованого підходу порушена в роботі [6], в якій оптимізація матеріалу розглядається відповідно до силової схеми конструкції. Тому, наприклад, для фібробетону розміри фібри, її форма, концентрація і розташування повинні змінюватися в перетині конструкції згідно силовому розрахунку. Напружений стан конструкції і буде визначатиме

«інтегрований матеріал» з перемінним модулем деформацій по перетину виробу [6].

Термін "інтегрований" може відноситися як до об'єднання завдань з однієї або декількох наукових галузей на якусь "надзадачу", так і об'єднання методів їх вирішення якимось універсальним "надметодом". Стосовно до будівництва об'єднання завдань може здійснюватися на рівні критерію оптимальності для окремої конструкції, фрагментів будівлі або споруди в цілому. Щодо вибору "універсального" методу ситуація менш певна через надзвичайну складність структури матеріалу і різноманітності механізмів її формування на різних рівнях організації матерії. Однак можна припустити, що створення такої об'єднавчої методики лежить на шляху застосування обчислювальної техніки, обчислювального експерименту, розвитку інформаційних технологій та методів комп'ютерного матеріалознавства.

Одним з багатообіцяючих напрямків у комп'ютерному матеріалознавстві є метод структурно-імітаційного моделювання (*СІМ*-метод) і технологія проведення імітаційних експериментів на його основі (*СІМ*-технологія). Під *СІМ*-методом розуміють процес формування на ЕОМ інформації про окремі структурні елементи системи, що моделюють (матеріалу і/або технології) і умовах їх взаємодії з наступним відтворенням на ЕОМ процесів, що протікають у системі при зміні зовнішніх впливів, у той час як *СІМ*-технологія передбачає ряд етапів з проведення обчислювального експерименту, таких як постановка задачі, опис концептуальної моделі, написання та налагодження програми, перевірка достовірності моделі і деякі інші процедури. Мабуть, є достатньо підстав для оцінки *СІМ*-методу як

потужного і ефективного засобу вирішення матеріалознавчих задач [7-9].

ЛІТЕРАТУРА:

1. Краковский М.Б. Методы оптимизации железобетонных конструкций на основе принципа разделения параметров // Авт. Дисс докт. техн. наук. – М.: НИИЖБ, 1980. – 49 с.
2. Рыков АС. Поисковая оптимизация. Методы деформируемых конфигураций. – М.: Физматлит, 1993. – 216 с. (с. 146-153).
3. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. Методы компьютерного материаловедения и технология бетона // Будівельні конструкції: Міжвід. наук.-техн. зб. – К.: НДІБК. – 2002. – Вип. 56: Сучасні проблеми бетону та його технологій. – С. 217-226.
4. Кондращенко В.И. Технология и свойства высокопрочного шлакопемзобетона. – Авт. дисс....канд. техн. наук. – М.: НИИЖБ, 1982. – 25 с.
5. Кондращенко В.И. Оптимизация составов и технологических параметров получения изделий брускового типа методами компьютерного материаловедения – Авт. дисс....докт. техн. наук. – М.: МИИТ, 2005. – 48 с.
6. Бондаренко В.М., Ивахнюк В.А., Колчунов В.И., Юрьев А.Г. Оптимизация материалов конструкции // Вестн. отделения строит. наук РААСН. – Вып. 3. – М.: 2000, с. 23-25.
7. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения. – М.: Стройиздат, 1982. – 196 с.
8. Баженов Ю.М., Воробьев В.А., Илюхин А.В. Компьютерное материаловедение строительных композитных материалов. Состояние и перспективы развития // Изв. вузов. Строительство. 1999. № 11, с. 25-28.
9. Аскадский А.А., Кондращенко В.И. Компьютерное материаловедение полимеров. Т. 1. Атомно-молекулярный уровень. – М.: Научный мир, 1999. – 544 с.